

赤方偏移空間における バイスペクトル

基礎物理学研究所 D1

橋本一彦

共同研究者：

樽家篤史(京都大), Yann Rasera(Paris Observatory)

加速膨張の起源

ダークエネルギー or 一般相対論の修正 ??

■ 観測による制限方法

宇宙の膨張率

： Ia型超新星, バリオン音響振動(BAO).. e.g. Perlmutter et al. ('99), Planck('15)

密度ゆらぎの成長

： 宇宙大規模構造..

銀河の3次元分布に現れる非等方性を測ると、
宇宙の膨張率と密度ゆらぎの成長率を同時に制限できる

キーワード **Redshift-space distortions**
 Alcock-Paczynski effects

RSDとAP効果

Redshift-space distortion (RSD)

分光観測において特異速度： v により生じる銀河分布の非等方性

赤方偏移空間

$$\mathbf{s} = \mathbf{r} + \frac{v_z(\mathbf{r})}{aH(z)} \hat{\mathbf{z}}$$

実空間

特異速度による赤or青方偏移

$\hat{\mathbf{z}}$: 視線方向

$v \propto f(z)$: 構造の成長率

一般相対論では $f(z) \simeq \{\Omega_m(z)\}^{0.55}$ となることが知られている
e.g. Linder ('05)

Alcock-Paczynski effect (AP効果)

Alcock & Paczynski. ('79)

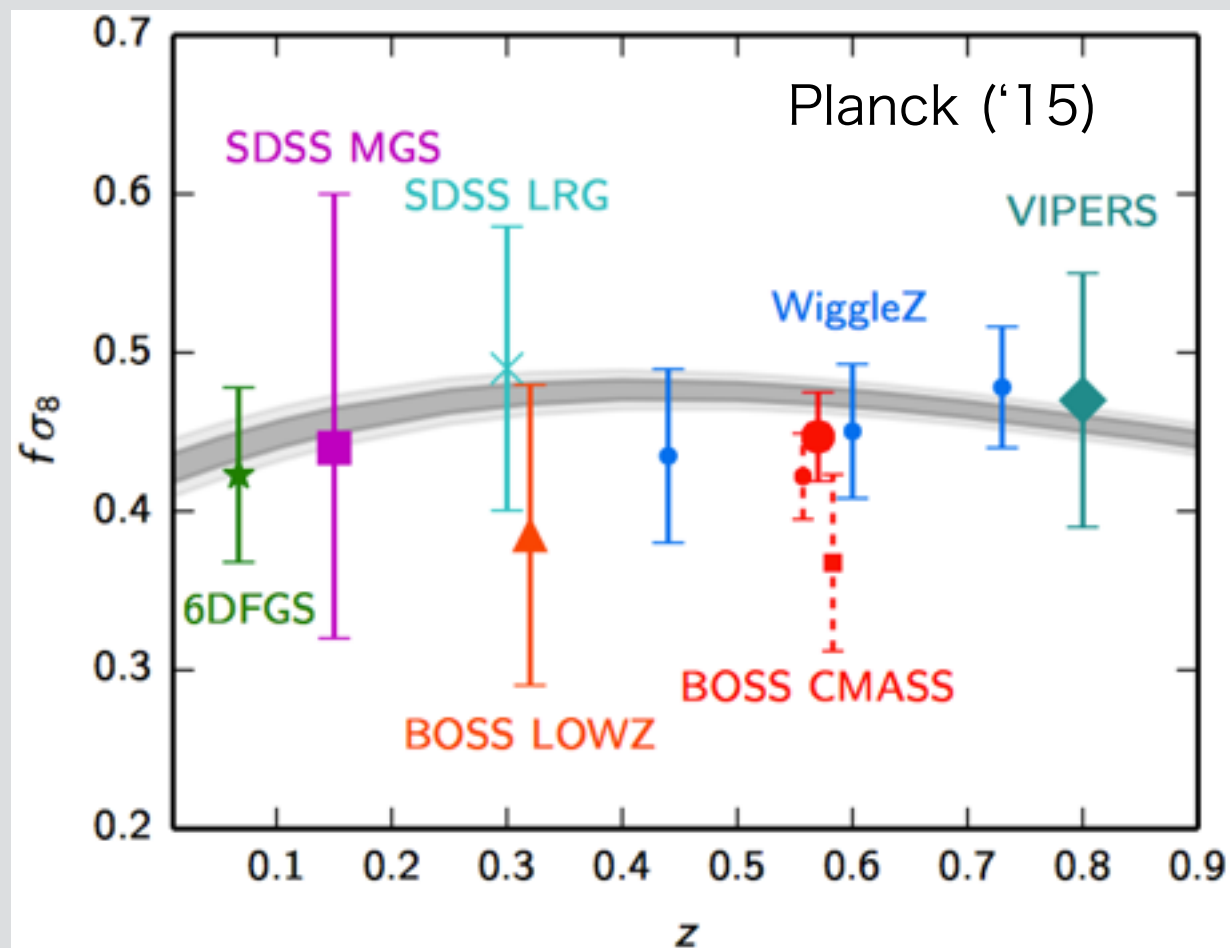
距離尺度の誤りにより生じる銀河分布の非等方性

BAOのスケールが等方的であることを用いて角径距離 D_A と
膨張率 H が制限できる

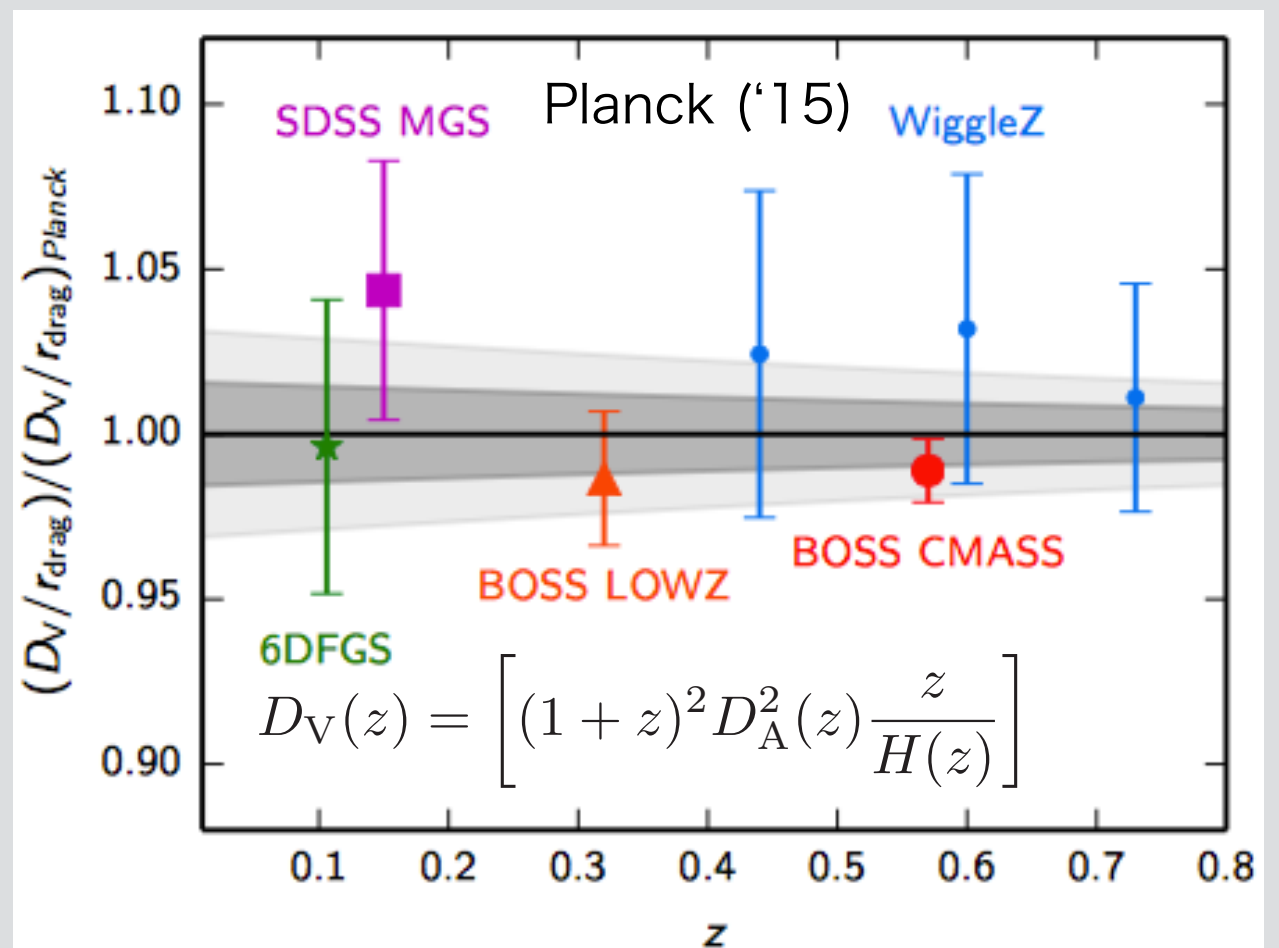
現状の制限

- ・主にパワースペクトルが用いられている
- ・~10%程度の制限が得られている
- ・ Λ CDMからのズレは検出されていない

$f(z)$ の制限

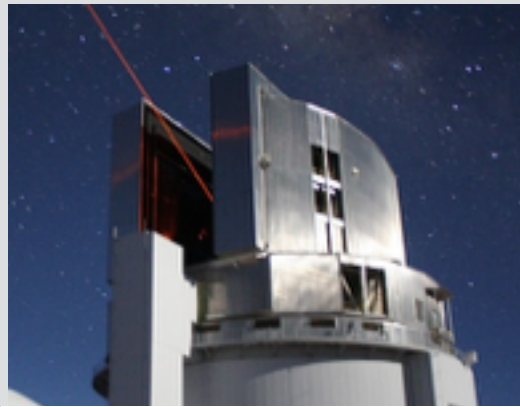


AP効果

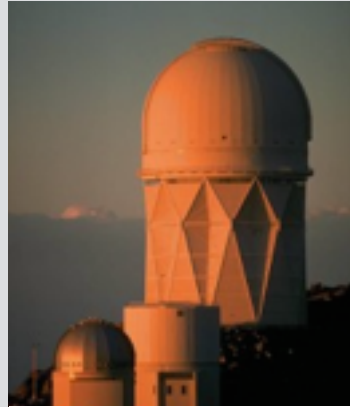


精密宇宙論時代に向けて

今後、分光観測からより精密で大規模なデータが得られる



SuMIRe('14~)

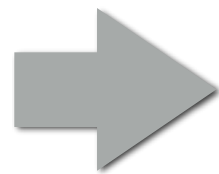


DESI('18~)

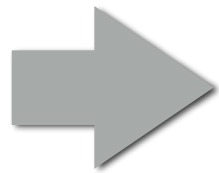


Euclid('20~)

より強い制限($\sim 1\%$)を得るにはわずかな系統誤差も排除する
精密な理論モデルが必要



理論で取り扱いやすい弱非線形領域までに限っても
強い制限が得られる方法論を確立したい



パワースペクトルに高次の統計量を加えることで
加速膨張の起源をより詳細に検証したい

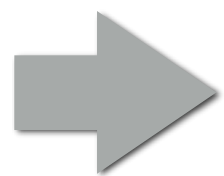
本研究の目的

バイスペクトルを組み合わせ高精度で宇宙の加速膨張を検証する方法論を確立する

バイスペクトルに現れるRSD & AP 効果の影響を弱非線形領域で精密にモデル化することで観測への応用を目指す

■ 赤方偏移空間でのバイスペクトル

$$\begin{aligned} & \langle \delta^{(s)}(\mathbf{k}_1) \delta^{(s)}(\mathbf{k}_2) \delta^{(s)}(\mathbf{k}_3) \rangle \\ &= (2\pi)^3 \delta_D(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) B^{(s)}(k_1, k_2, \theta_{12}, \mu, \phi) \end{aligned}$$



一般に5変数になってちょっと複雑
どうやって特徴付ける？

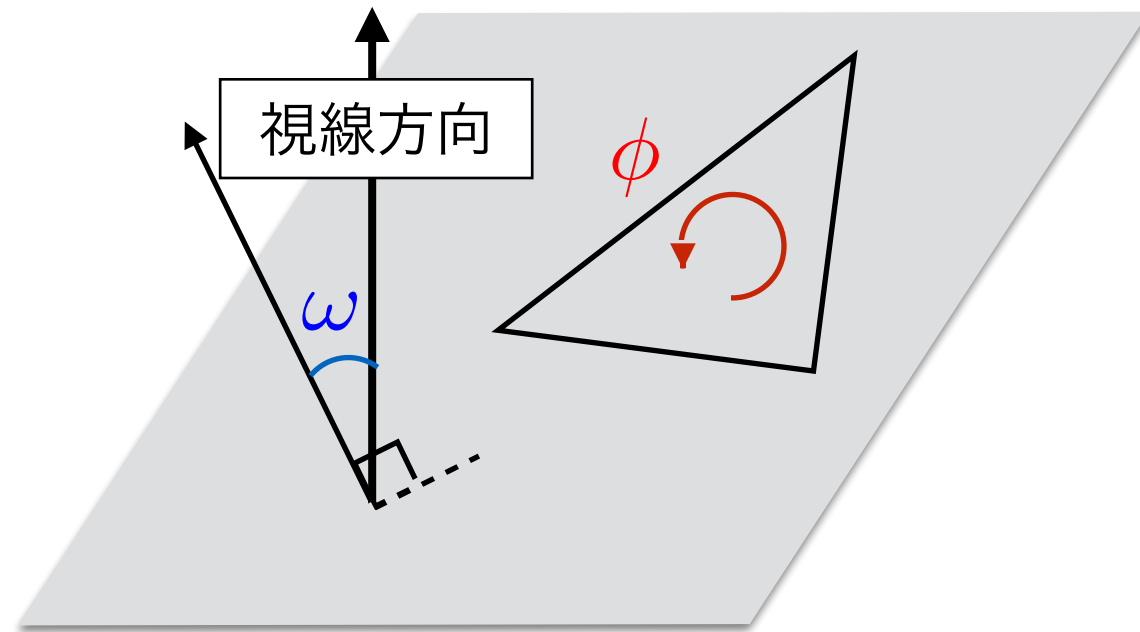
多重極展開

バイスペクトルの非等方性を次のようなパラメータで特徴づける

$$B^{(s)}(k_1, k_2, \theta_{12}, \mu, \phi)$$

$$\mu = \cos \omega$$

$$\cos \theta_{12} = \hat{k}_1 \cdot \hat{k}_2$$



非等方性の効果を読み取るためルジャンドル多項式で展開

$$\hat{B}_\ell^{(s)}(k_1, k_2, \theta_{12}) = \int_{-1}^1 d\mu \int_0^{2\pi} \frac{d\phi}{2\pi} B^{(s)}(k_1, k_2, \theta_{12}, \mu, \phi) P_\ell(\mu)$$

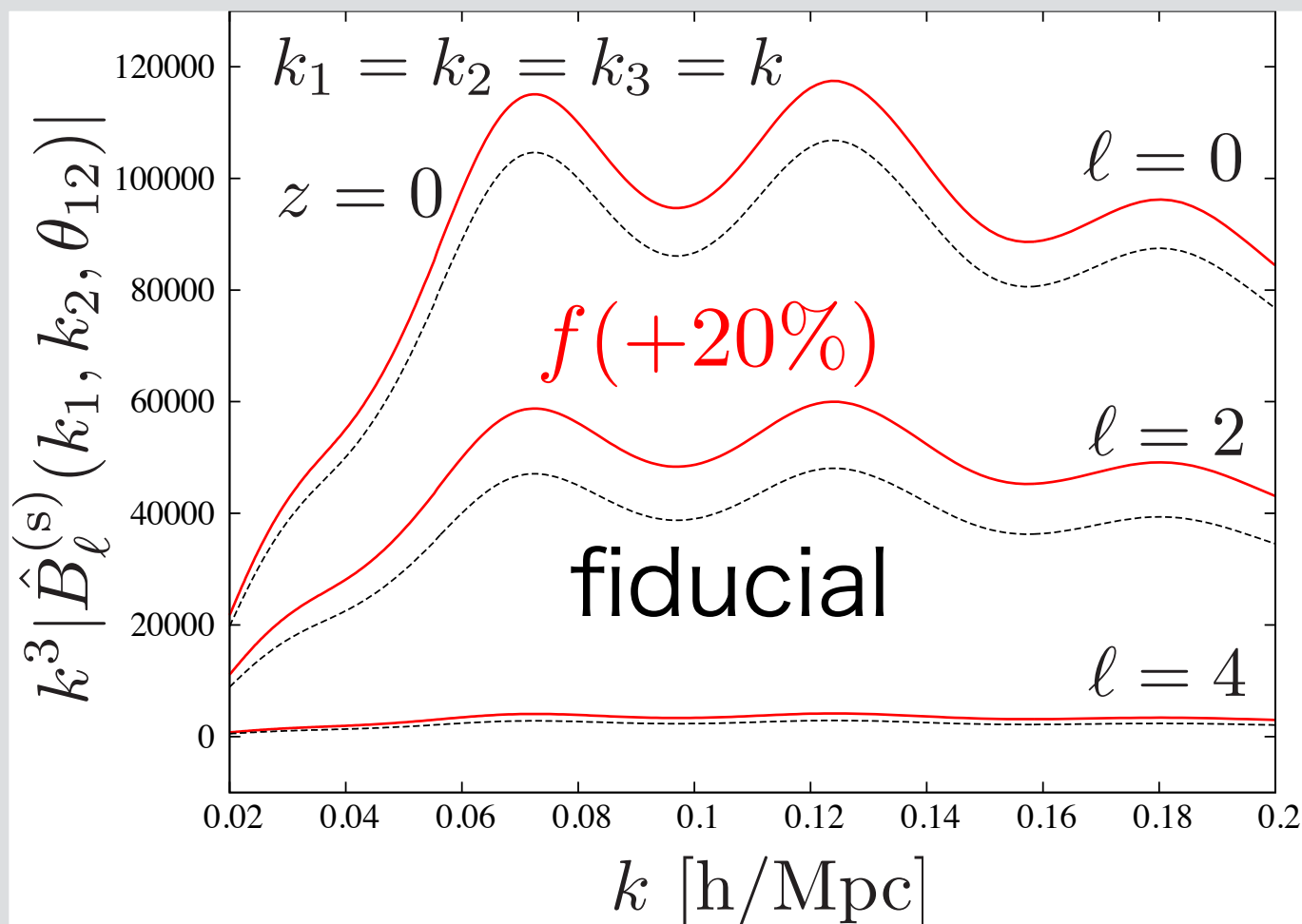
- ・ 赤方偏移空間で $\ell = 2$ 以上が現れる
- ・ k_1, k_2, k_3 の入れ替えについて対称な定義

cf. Scoccimarro et al.('98)

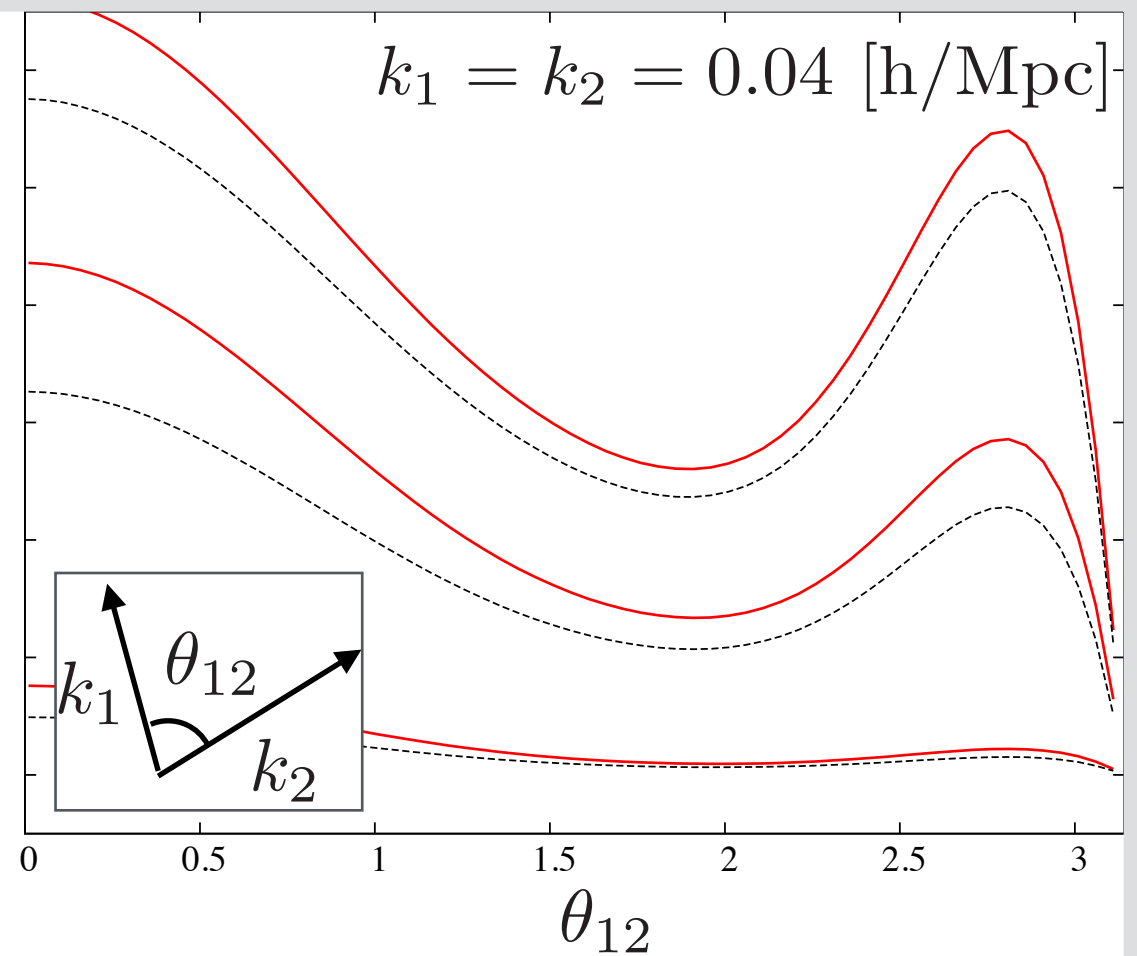
成長率とバイスペクトル

摂動論の最低次(tree level)でバイスペクトルを計算

正三角形のバイスペクトル



二等辺三角形



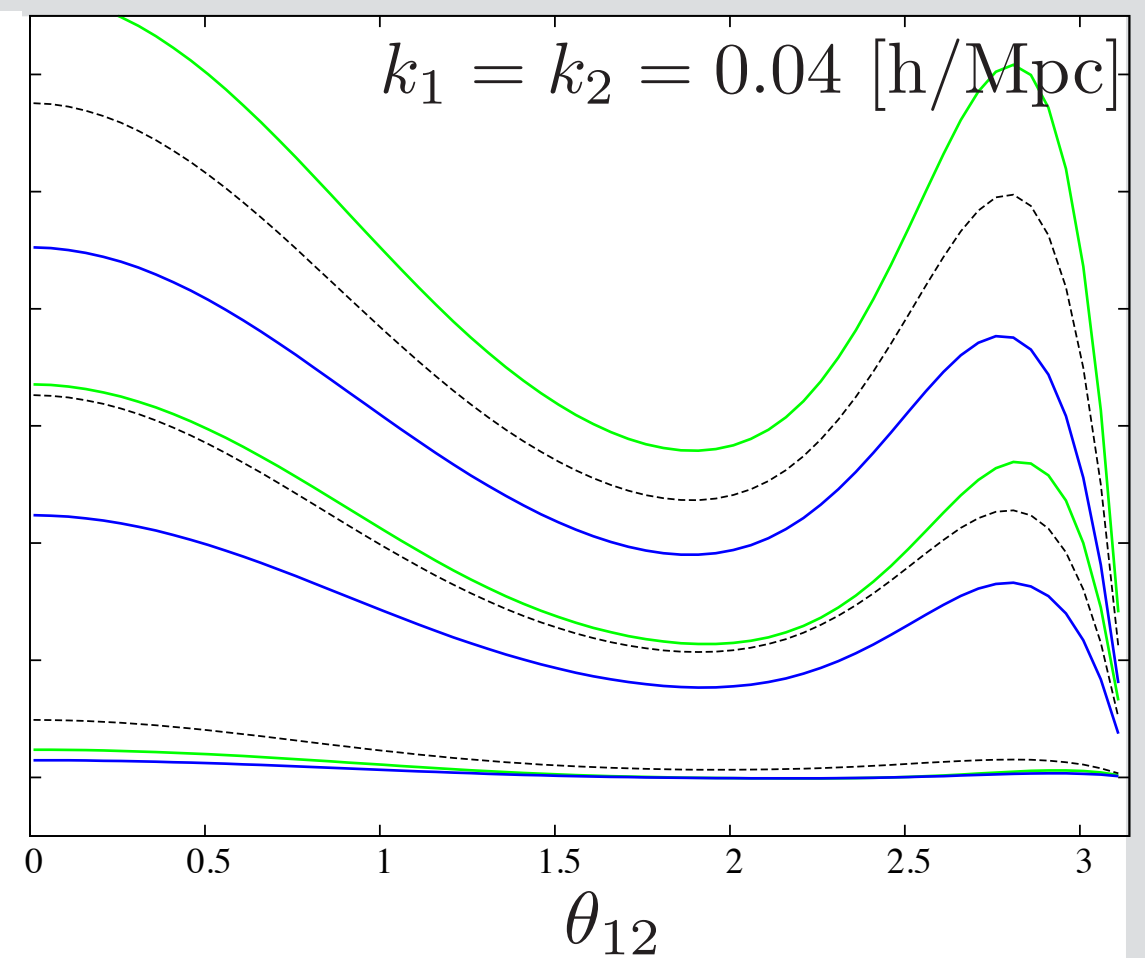
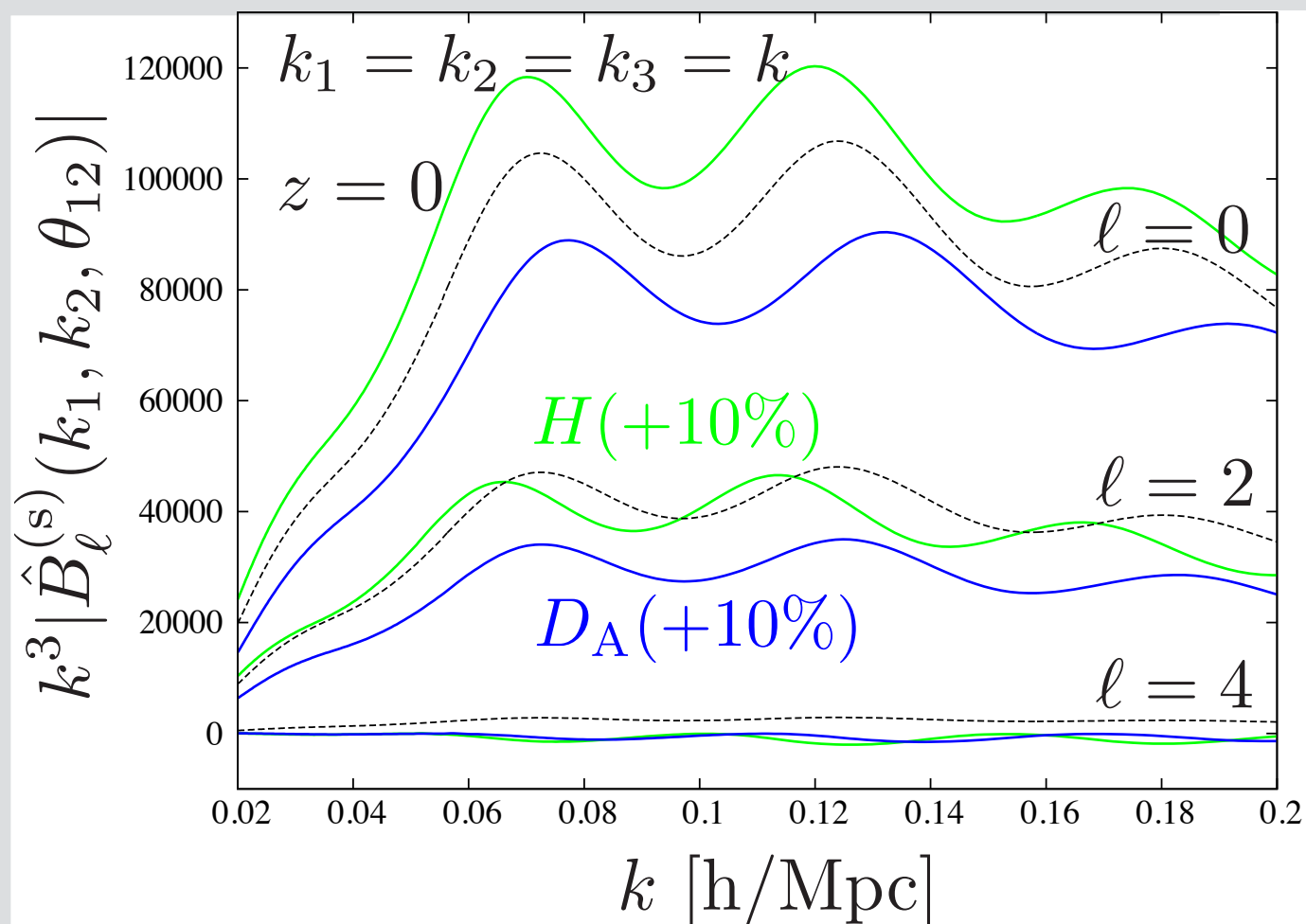
成長率: $f(z)$ はバイスペクトルの振幅に影響する

AP効果とバイスペクトル

摂動論の最低次(tree level)でバイスペクトルを計算

正三角形のバイスペクトル

二等辺三角形



AP効果はバイスペクトルの振幅とBAOスケールに影響する

先行研究：統計誤差の改善

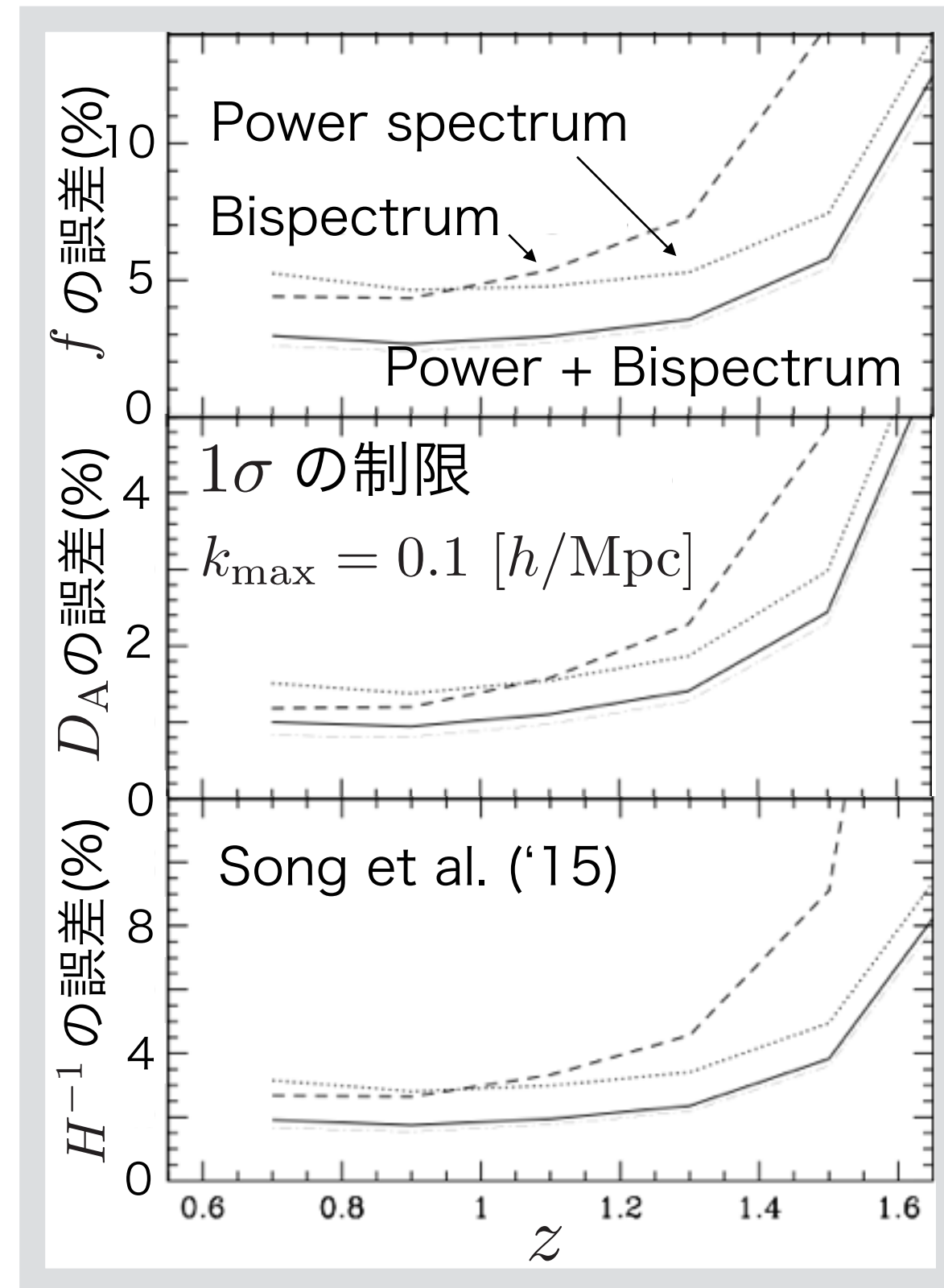
■ Greig et al. ('13)

- ・ライマン α 輝線銀河における
輻射輸送効果とRSDの縮退を解く

■ Song et al. ('15)

- ・パワースペクトルのみの場合と比べ
統計誤差を2倍程度改善する
- ・DESIにより f , H , D_A を数%の精度
で制限できる

精密理論モデルを構築し、
系統誤差を抑える必要がある



先行研究：理論モデル

■ Scoccimarro ('98)

- 現象論的なモデルを構築し、tree levelの計算を改善

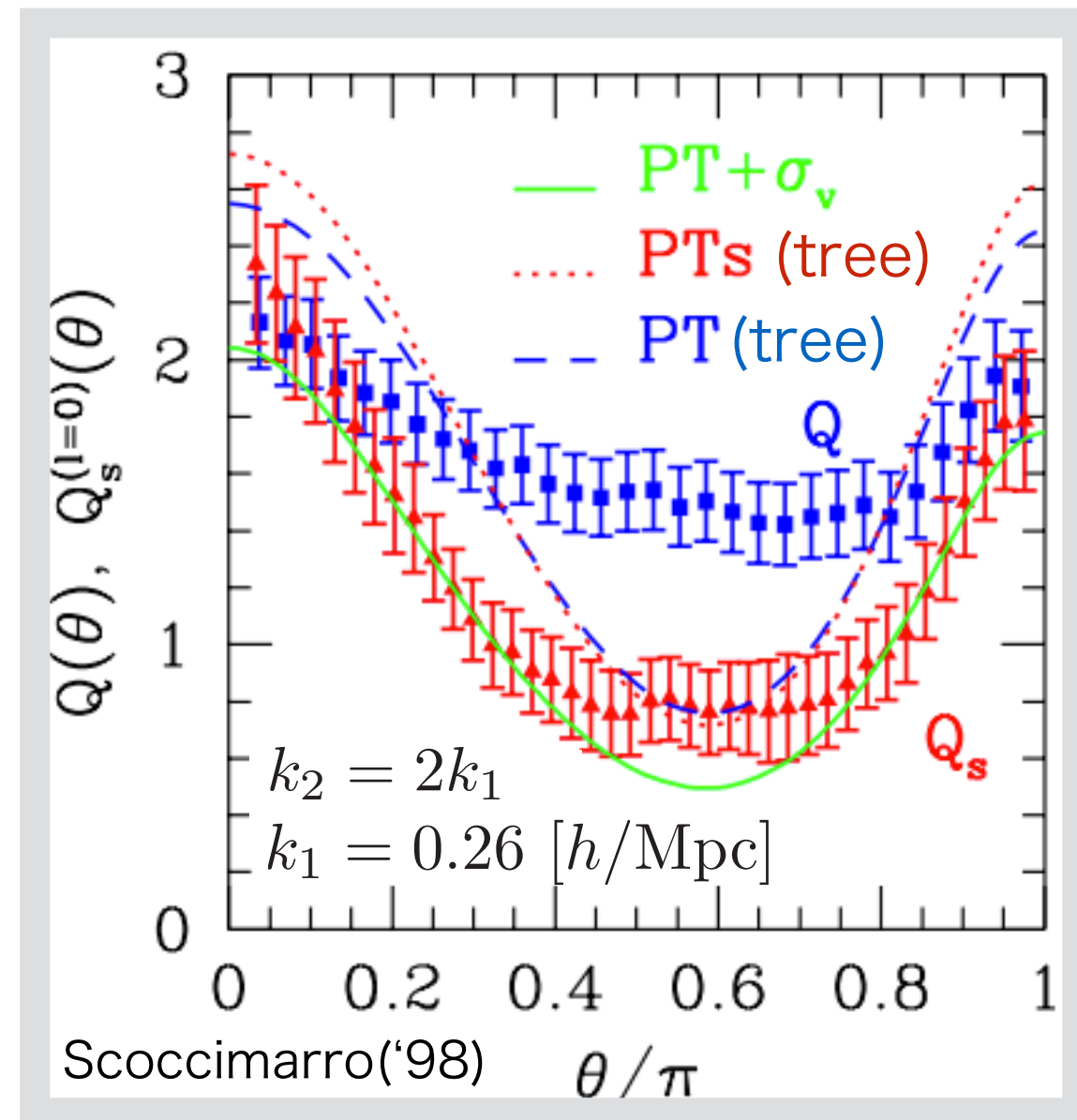
$$B^{(S)}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3) \simeq \underbrace{e^{-(k_1^2 \mu_1^2 + k_2^2 \mu_2^2 + k_3^2 \mu_3^2) \sigma_v^2}}_{\text{減衰の効果}} B^{\text{PT}}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3), \quad \mu_i = \hat{\mathbf{k}}_i \cdot \hat{\mathbf{z}}$$

B^{PT} : 摂動論で計算(tree level)

σ_v : free parameter

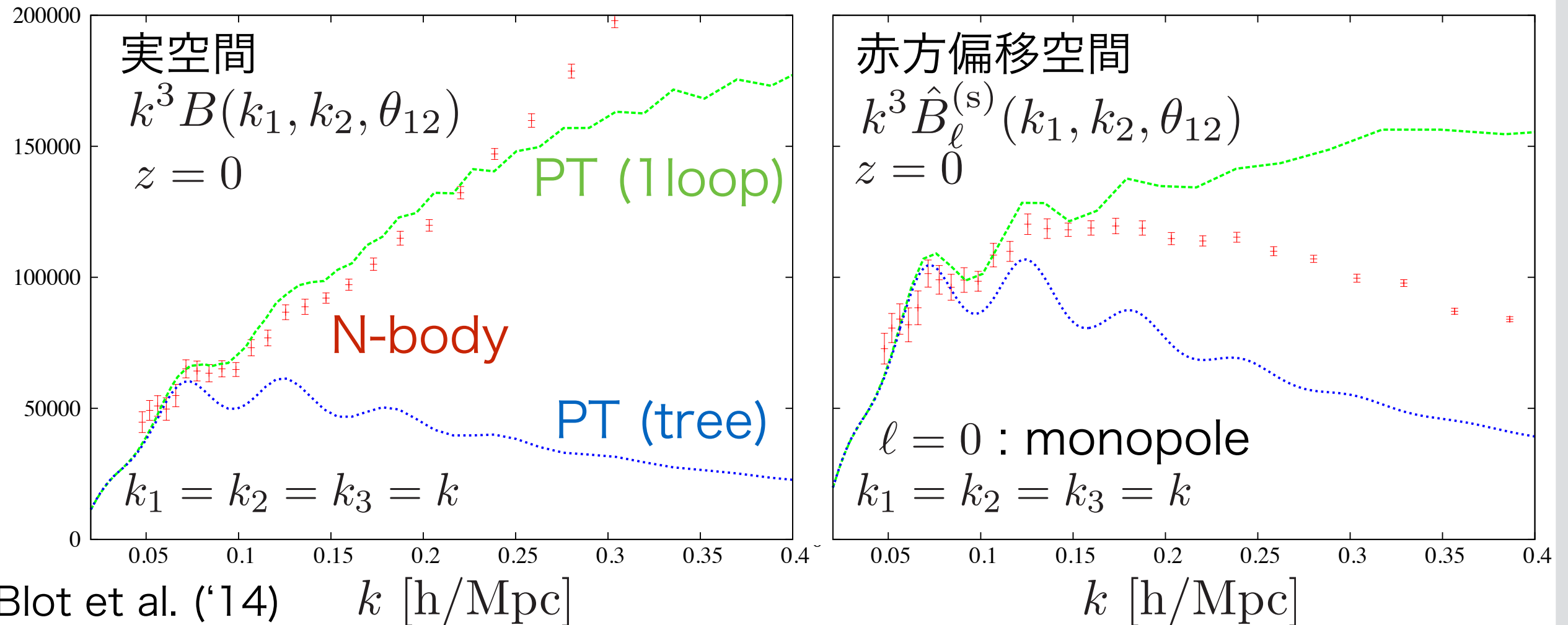
- ただしパワースペクトルの場合、
こうした現象論モデルは数%の
系統誤差を生み出す Taruya et al.('10)

さらに高次の摂動項(1-loop)を
計算してみる



摂動論の適応範囲

N体シミュレーションとの比較：波数依存性



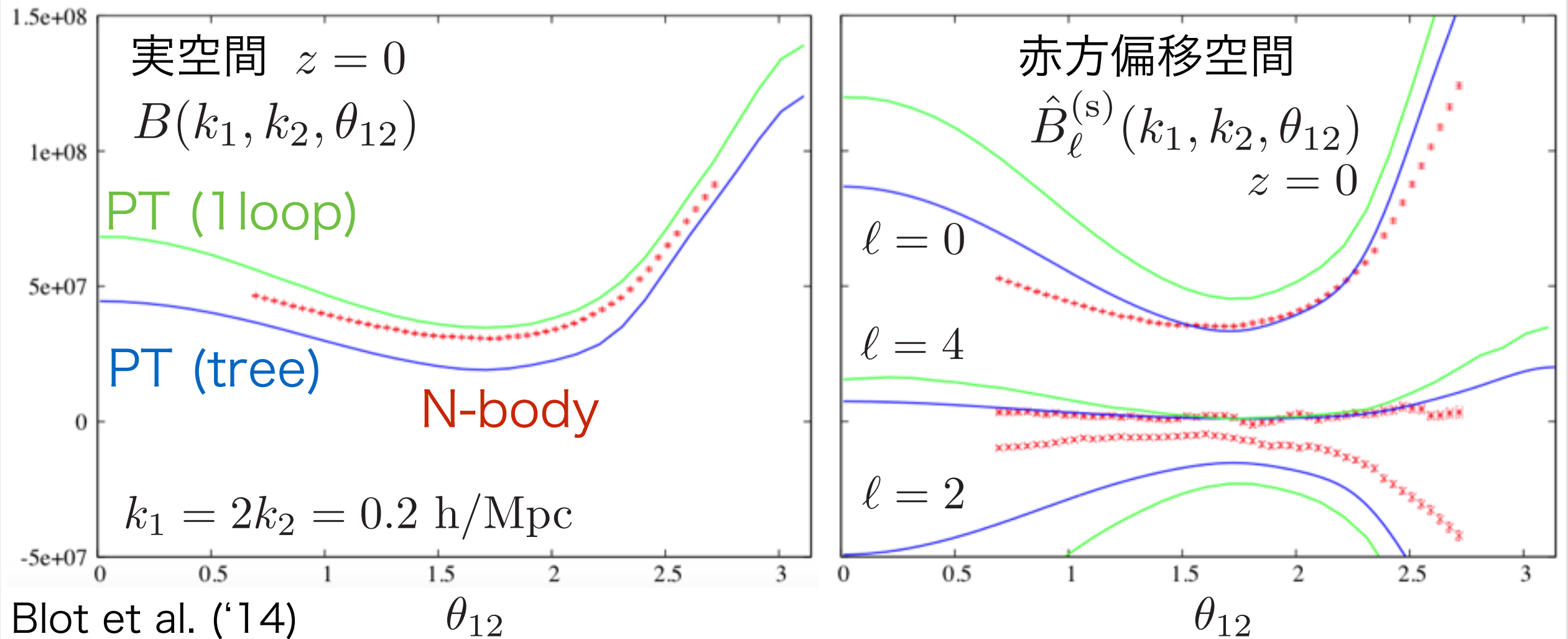
Blot et al. ('14) k [h/Mpc]

Box size : 656.25 Mpc/h, Particle number : 1024^3 , Realization : 64

赤方偏移空間では小スケールでバイスペクトルが減衰する

摂動論の適応範囲

N体シミュレーションとの比較：形状依存性



Blot et al. ('14)

θ_{12}

Box size : 656.25 Mpc/h, Particle number : 1024^3 , Realization : 64

赤方偏移空間では1-loopの方が一致が悪い
(非線形性が強すぎる?)

まとめ

■ 研究の目的

加速膨張の起源を詳細に調べるため、バイスペクトルの精密理論モデルを構築したい

■ やったこと

1-loopの摂動計算からバイスペクトルを求め、
N体計算の結果と比較する

➡ 赤方偏移空間では小スケールの減衰の効果が現れる

■ 今後の課題

キュムラント展開などの手法を用いてより精密な
理論モデルを構築する

Taruya et al('10)